Journal of Water and Soil
https://jsw.um.ac.ir

Research Article
Vol. 36, No. 2, May-June 2022, p. 301-317

Field-Scale Agricultural Drought Monitoring Based on Microwave Imagery of Soil Moisture

M. Fashaee [1*], S.H. Sanaei-Nejad [2], M. Quchanian [3]

Received: 04-12-2021 Revised: 07-03-2022 Accepted: 17-04-2022 Available Online: 21-07-2022	**How to cite this article:** Fashaee M., Sanaei-Nejad S.H., and Quchanian M. 2022. Field-Scale Agricultural Drought Monitoring Based on Microwave Imagery of Soil Moisture. Journal of Water and Soil 36(2): 301-317. (In Persian with English abstract) **DOI:** 10.22067/JSW.2022.73711.1118

Introduction

Drought analysis in agriculture can not only be achieved by measuring precipitation changes but also by using other parameters such as soil moisture. Due to the fact that soil moisture affects plant growth and yield, it is often considered for monitoring agricultural drought. Remote sensing data are often provided from three sources: microwave, visible and thermal. Most satellite soil moisture-based algorithms rely on passive microwave images, active microwaves, or a combination of data from several different sensors. Among the various remote sensing methods, the microwave electromagnetic spectrum has fewer physical limitations than other spectrum in measuring soil moisture. However, microwave soil moisture data often have very large pixel dimensions (more than 10 km), making it difficult to use them on a small scale.

Materials and Methods

In this study, in order to calculate the agricultural drought index at the field-scale, AMSR2 Retrieval data were calibrated first using field moisture measurement data in the Neishabour plain during 2017 to 2019. During the research period, 560 soil samples (20 samples in 28 shifts) were collected and soil moisture was measured in the laboratory of the Department of Water Science and Engineering, Ferdowsi University of Mashhad. LPRM_AMSR2_ SOILM3_001 is one of the third level products of the AMSR2 sensor, which is produced on a daily basis with a spatial resolution of 25 × 25 km^2. Land surface parameters including surface temperature, surface soil moisture and plant water availability were obtained by passive microwave data using the Land parameter Retrieval Method (LPRM). Then, by using Modis sensor images (NDVI and LST), linear downscaling equations were extracted. The dimensions of the AMSR2 images were reduced from 25 kilometers to 1000 meters using these equations. In next step, SMADI Agricultural Drought Index, which is a combination of vegetation characteristics, soil moisture and land surface temperature, was used to monitor agricultural drought at the field-scale. Statistical indicators such as coefficient of determination (R^2), mean absolute error (MAE) and root mean square error (RMSE) were also used to evaluate the statistical performance.

Results and Discussion

By visual analysis of the role of vegetation and land unevenness, it was found that these two factors affect the regression relationships extracted for calibration of remote sensing data. The RMSE and MAE values for the regression equations used in the calibration process were calculated in the range of 1.6 to 4%, which can be considered acceptable in comparison with the mean values of the soil moisture data (15 to 20). The results showed that changes in SMADI index in three land use zones including rainfed cultivation (R1), medium rangeland (R2) and poor rangeland (R3) have experienced a similar trend to precipitation changes, illustrating

1, 2 and 3- Ph.D. in Agrometeorology, Professor and Ph.D. Candidate in Irrigation and Drainage Engineering, Department of Water Science and Engineering, Agriculture Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, respectively.
(*- Corresponding Author Email: mo.fashaee@alumni.um.ac.ir)

that precipitation is one of the most effective factors in major changes in SMADI agricultural drought index fluctuations. It was also observed that SMADI index changes with a delay of 1 to 8 days compared to the precipitation changes in all three zones. In all three zones, the SMADI index followed a similar trend to in-situ soil moisture changes. At mot 80% of the changes in SMADI-R1 index can be explained by in-situ SM-R1, and the rest of the changes were related to other environmental factors or measurement error. This decreases to 68% in the R3 zone. It should be noted that soil moisture monitoring can more accurately reflect the impact of environmental factors on the changes in agricultural drought index such as SMADI than other variables; because the rainfall recorded at the meteorological station does not necessarily occur uniformly throughout the study area. On the other hand, any amount of precipitation will not necessarily lead to an effective change in soil moisture storage. This also renders assessment of the performance of agricultural drought indicators difficult.

Conclusion

Examination of statistical indices of coefficient of determination (R2), mean absolute error value (MAE) and root mean square error (RMSE) showed that the algorithm used in downscaling as well as estimating SMADI agricultural drought index is well able to reflect the interactions between precipitation, soil moisture, vegetation and changes in canopy temperature profile. This feature justifies and strengthens its application in agrometeorological analysis.

Keywords: AMSR2, Downscaling, Land surface temperature, Passive microwave, Water deficit

نشریه آب و خاک
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۳۶، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۱، ص ۳۱۷-۳۰۱

پایش خشکی کشاورزی در مقیاس مزرعه مبتنی بر تصاویر دورسنجی مایکروویو رطوبت خاک

محمد فشائی[1*]– سیدحسین ثنائی نژاد[2]– مرجان قوچانیان[3]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۱۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۸

چکیده

وقوع خشکسالی در کشاورزی صرفا با اندازه‌گیری تغییرات بارش قابل رصد نیست بلکه متغیرهای دیگری همچون رطوبت خاک نیز در آن نقش دارند. در میان روش‌های مختلف دورسنجی، طیف الکترومغناطیس مایکروویو محدودیت‌های فیزیکی سایر امواج رادیومتری در اندازه‌گیری رطوبت خاک را ندارد. با این تفاوت که داده‌های مایکروویو رطوبت خاک غالبا دارای ابعاد پیکسل بسیار بزرگ (بیش از ۱۰ کیلومتر) هستند و این موضوع کاربرد آنها در مقیاس‌های کوچک را با مشکل مواجه می‌سازد. در این پژوهش به منظور محاسبه شاخص خشکی کشاورزی در مقیاس مزرعه، ابتدا با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری میدانی رطوبت در محدوده دشت نیشابور طی سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۳۹۸، واسنجی داده‌های بازیابی رطوبت خاک سنجنده AMSR2 انجام شد. سپس با کمک تصاویر سنجنده مودیس روابط خطی ریزمقیاس نمایی تصاویر رطوبت خاک استخراج شده و ابعاد تصویر از ۲۵ کیلومتر به ۱۰۰۰ متر کاهش یافت. در گام بعدی از شاخص خشکی کشاورزی SMADI که تلفیقی از خصوصیات پوشش گیاهی، رطوبت خاک و دمای سطح زمین است برای پایش خشکی کشاورزی در مقیاس مزرعه استفاده شد. به منظور ارزیابی نتایج، شاخص‌های آماری ضریب تعیین (R^2)، میانگین قدرمطلق خطا (MAE) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) در سه کاربری اراضی منتخب شامل زراعت دیم (R1)، مرتع متوسط (R2) و مرتع فقیر (R3) بررسی شد. شاخص‌های MAE و RMSE در بازه ۱٫۶ تا ۴ و شاخص R^2 در بازه ۰٫۷۳ تا ۰٫۸۴ قرار گرفت. نتایج نشان داد که الگوریتم استفاده شده در ریزمقیاس نمایی و همچنین برآورد شاخص خشکی کشاورزی SMADI به خوبی قادر به بازتاب اندرکنش‌های بین بارش، رطوبت خاک، پوشش گیاهی و تغییرات پروفیل دمایی کانوپی است و این ویژگی کاربرد آن را در تحلیل‌های هواشناسی کشاورزی توجیه و تقویت می‌کند.

واژه‌های کلیدی: دمای سطح زمین، ریزمقیاس نمایی، کمبود آب گیاه، مایکروویو غیرفعال، AMSR2

مقدمه

آنگاه که انطباق مناسبی بین داده‌های دورسنجی و ویژگی‌های اندازه‌گیری شده خاک و گیاه صورت گیرد ما می‌توانیم در مورد شرایط نواحی پهناوری که در مورد آن‌ها اندازه‌گیری میدانی انجام نشده باشد نتیجه‌گیری کنیم. به این ترتیب ارزش واقعی سنجش از دور یعنی توانایی در کسب اطلاعات وسیع با نیروی انسانی، هزینه و زمان کمتر حاصل می‌شود.

باتوجه‌به اینکه رطوبت خاک بر رشد گیاه و عملکرد آن تاثیر می‌گذارد لذا اغلب برای پایش خشکسالی کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین رطوبت خاک یک متغیر ویژه مهم برای نظارت بر پایداری و توسعه خشکسالی است (AghaKouchak, 2014; Boken, 2005; Wilhite, 2005). تکنیک‌های سنجش از دور معمولا داده‌های رطوبت خاک را برای یک گستره مکانی بزرگ و با قدرت تفکیک زمانی متوسط برای سطح زمین با هزینه‌های اندک ارائه می‌کنند (Mohanty *et al.*, 2017). تحقیقاتی که پیرامون اطلاعات به‌دست آمده از مشاهدات رطوبت خاک ماهواره‌ای (در مقایسه با رطوبت خاک مدل شده و بارش زمینی مشاهده شده) در مورد تنش آبی و تأثیر آن بر تنوع تولید محصول انجام شده نشان داد که رطوبت خاک برای نشان دادن خشکسالی کشاورزی از بارش در

۱، ۲ و ۳- به‌ترتیب دانش آموخته دکتری هواشناسی کشاورزی، استاد و دانشجوی دکتری مهندسی آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: mo.fashaee@alumni.um.ac.ir)
DOI: 10.22067/JSW.2022.73711.1118

شرایط خشکسالی مناسب تر است، زیرا ارتباط بیشتری با کاهش عملکرد محصول دارد (Modanesi *et al.*, 2019؛ Niazi *et al.*, 2018).

داده‌های دورسنجی غالبا از سه منبع مایکروویو، نوری و حرارتی تامین می‌شود (Peng and Loew, 2017). اغلب الگوریتم‌های مبتنی بر رطوبت خاک ماهواره‌ای، متکی بر تصاویر مایکروویو غیرفعال (Chen *et al.*, 2016)، مایکروویو فعال (Takada *et al.*, 2009)، یا ترکیبی از داده‌های چند سنجنده مختلف هستند (Entekhabi *et al.*, 2010؛ Kim and Hogue, 2012). در مقایسه با سنجش از دور مایکروویو غیرفعال، سنسورهای حرارتی/نوری دارای توانایی بازیابی رطوبت خاک سطحی در مقیاس مکانی کوچک‌تر هستند. هرچند داده‌های ماهواره‌های حرارتی/نوری حساسیت بیشتری به عوامل محیطی از قبیل شرایط هواشناسی و پوشش گیاهی و وجود ابر و غبار دارند (Adegoke and Carleton, 2002).

در حال حاضر ماهواره‌های متعددی مانند SMAP، SMOS، ASCAT، AMSRE، و ESA GGI وجود دارند که قادر هستند با فاصله زمانی دو تا سه روزه بازیابی رطوبت سطحی خاک را ارائه کنند (Chen and Wang, 2018؛ Montzka *et al.*, 2017).

البته سنجنده‌ها قادر نیستند به طور مستقیم رطوبت خاک را اندازه‌گیری نمایند. روابطی تجربی وجود دارند که دمای روشنایی مایکروویو غیرفعال را بر اساس رابطه بین گذردهی خاک و مقدار آب در خاک، به رطوبت خاک مرتبط می‌سازند (Wang and Qu, 2009).

بررسی دو مدل پرکاربرد بازیابی داده‌های رطوبت خاک سنجنده AMSR2 که یکی به نام JAXA و دیگری LPRM شناخته می‌شود حاکی از آن است که روش LPRM از خطای RMSE کمتری نسبت به JAXA برخوردار است. (Kim *et al.*, 2015).

ضخامت بسیار کم لایه سطحی (۲ تا ۷ سانتی‌متر) که توسط ماهواره سنجش می‌شود، مقیاس بزرگ تصاویر ماهواره‌ای (حدود ۲۰ کیلومتر) و کیفیت پایین در شرایط خاص مثل پوشش گیاهی متراکم و کوهستانی بودن مناطق جز بزرگ‌ترین محدودیت‌های فعلی تکنیک‌های تخمین رطوبت خاک با استفاده از سنجش از دور هستند (Brocca *et al.*, 2017؛ Dostálová *et al.*, *2014*). به همین دلیل بخشی از پژوهش‌ها در حوزه رطوبت خاک و هواشناسی کشاورزی به ویژه در سال‌های اخیر به اعتبارسنجی، ریزمقیاس‌نمایی و یا تلفیق داده‌های سایر سنجنده‌های منابع طبیعی با تصاویر مایکروویو رطوبت خاک اختصاص یافته تا بتوان برای کاربری‌های مختلف از آن بهره برد (Adnan *et al.*, 2016؛ Martinez-Fernández *et al.*, 2020؛ Zhang *et al.*, 2014؛ Zhu *et al.*, 2019).

به طور معمول ریزمقیاس نمایی با کمک یک متغیر واسط همچون دمای سطحی یا پوشش گیاهی صورت می‌گیرد. به‌طور مثال، بر اساس رابطه اینرسی حرارتی مابین تغییرات دمای روزانه و متوسط رطوبت خاک ترکیب شده با شرایط پوشش گیاهی، می‌توان ریزمقیاس‌نمایی داده‌های رطوبت خاک سنجنده SMOS و AMSR-E از ۲۵ کیلومتر به ۱ کیلومتر را انجام داد (Fang and Lakshmi, 2014) و یا می‌توان تصاویر بزرگ مقیاس (۲۵ کیلومتر) رطوبت خاک به‌دست آمده از داده‌های مایکروویو را از طریق ادغام با تصاویر دما-پوشش گیاهی (TVDI) سنجنده مودیس، ریزمقیاس (۱۰ کیلومتر) نمود (Farokhi *et al.*, 2019؛ Wang *et al.*, 2016). همچنین رطوبت خاک ماهواره فعال-غیرفعال رطوبت خاک (SMAP) نیز با استفاده از داده‌های MODIS ریزمقیاس شده است (Fashaee and Sanaei-Nejad, 2021؛ Ghafari *et al.*, 2020).

کاربرد شاخص های مرسوم خشکی کشاورزی همچون شاخص رطوبت استاندارد شده تجربی (ESSMI)، شاخص کمبود آب (SWDI)، شاخص رطوبت خاک (SMI)، شاخص شرایط خشکی کشاورزی (ADCI)، شاخص سلامت پوشش گیاهی(VHI)، شاخص رطوبت اشباع خاک (SMSI) و شاخص خشکی یکپارچه مایکروویو (MIDI) نشان می دهد که رطوبت خاک، فعالیت گیاهی و دمای سطح زمین مهم ترین متغیرهای مرتبط با خشکسالی هستند (Sur *et al.*, 2019). اغلب این شاخص ها زمانیکه با استفاده از داده‌های دورسنجی مورد استفاده قرار می‌گیرند از سازگاری مکانی و زمانی خوبی با وقایع خشکی کشاورزی برخوردارند (Carrão *et al.*, 2016)، همچنین در مناطق هموار و غیرکوهستانی نتایج بهتری حاصل می‌شود (Paredes-trejo and Barbosa, 2017)، با کمک سایر تصاویر ماهواره‌ای که از منبع نوری/حرارتی استفاده می‌کنند می‌توان دامنه کاربرد این شاخص‌ها را توسعه داده و از جمله در ارزیابی پدیده سیل مورد توجه قرار داد (Saha *et al.*, 2018)، این مزیت نیز وجود دارد که یک شاخص با کمک داده‌های سنجنده‌های مایکروویو متنوعی آزموده شده و نتایج آن با هم مقایسه شود (Zhu *et al.*, 2019). از سوی دیگر داده‌های دورسنجی رطوبت خاک از این قابلیت برخوردار هستند که در تصحیح بانک‌های اطلاعاتی مرسوم رطوبت خاک در کشورهای مختلف به‌کار گرفته شود (Mladenova *et al.*, 2020).

اگرچه رطوبت خاک را در مقیاس کوچک توسط سنجش از دور مایکروویو فعال نیز می‌توان بازیابی کرد، اما استفاده از داده‌های سنجش از دور فعال برای تخمین رطوبت خاک به دلیل وابستگی زیاد این داده‌ها به زبری سطح و پوشش گیاهی به سختی امکان‌پذیر است و تخمین‌های رطوبت خاک بازیابی شده از این طریق، دارای عدم قطعیت بیشتری هستند (Jagdhuber *et al.*, 2019).

در این پژوهش با هدف دورسنجی پایش خشکی کشاورزی (کمبود آب گیاه) در مقیاس مزرعه با استفاده از داده‌های دورسنجی رطوبت خاک؛ داده‌های بازیابی رطوبت خاک مایکروویو غیرفعال

سنجنده AMSR2 به همراه تصاویر سنجنده مودیس و با اتکا به داده‌های رطوبت خاک اندازه‌گیری شده میدانی مورد استفاده قرار گرفت. برآورد شاخص خشکی کشاورزی که کاملا مبتنی بر داده‌های ماهواره‌ای بوده و با استفاده از طیف مایکروویو و در مقیاس مزرعه محاسبه شده باشد دستاورد نوآورانه این پژوهش است.

مواد و روش‌ها

حوضه آبریز نیشابور در طول جغرافیایی '۱۷°۵۸ تا '۳۰°۵۹ و عرض جغرافیایی '۴۰°۳۵ تا '۳۹°۳۶ واقع شده است. وسعت کل حوضه آبریز دشت نیشابور حدود ۷۳۵۰ کیلومتر مربع است. دشت نیشابور با وسعت ۳۴۷۷ کیلومتر مربع، ۴۷/۴۴ درصد مساحت حوضه آبریز نیشابور را تشکیل می‌دهد. (Velayati, 2000)

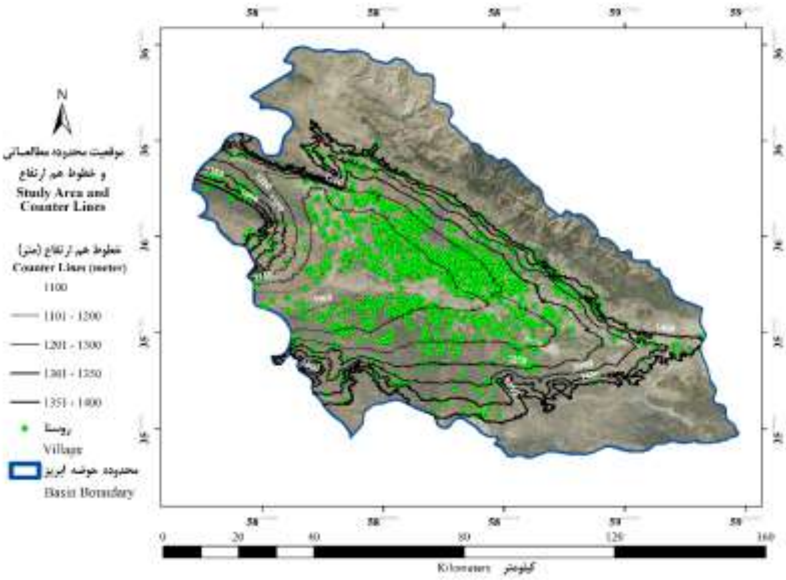
در این پژوهش بخشی از دشت مورد استفاده قرار گرفت که دامنه تغییرات ارتفاع در آن از حدود ۳۰۰ متر تجاوز نکند. در شکل ۱ نقشه موقعیت محدوده مطالعاتی، خصوصیات توپوگرافی و موقعیت روستاها نمایش داده شده است. همچنین در شکل ۲ کاربری اراضی در محدوده مطالعاتی معرفی شده است. بخش اعظم محدوده مطالعاتی به زراعت دیم و مراتع فقیر و متوسط اختصاص یافته است. توزیع جغرافیایی روستاها در این شکل می تواند به‌عنوان یک شاخص برای تحلیل بصری مطلوب بودن آب و خاک مورد توجه باشد.

داده‌های ماهواره‌ای

الف) سنجنده AMSR2: این سنجنده نسخه جدیدتر سنجنده AMSR-E است که توسط JAXA طراحی و از سال ۲۰۱۲ روی ماهواره GCOM- W1 نصب شد. مکانیزم تصویربرداری کانونی، این سنجنده را قادر می‌سازد تا داده‌های شب و روز را در پوششی به وسعت ۹۹ درصد سطح زمین در طی ۲ روز ارائه دهد. این سنجنده برای تولید نقشه‌های بخار آب، آب مایع موجود در ابر، درجه حرارت سطح دریا، سرعت باد سطح دریاها، تمرکز یخ دریا، عمق برف و محتویات رطوبت خاک زمین مناسب است (NOAA, 2020).

محصول LPRM_AMSR2_ SOILM3_001 یکی از محصولات سطح سوم سنجنده AMSR2 است که به‌صورت روزانه و با قدرت تفکیک مکانی ۲۵ در ۲۵ کیلومتر مربع تولید می‌شود. پارامترهای سطح زمین شامل دمای سطحی، رطوبت خاک سطحی و موجودیت آب گیاه توسط داده‌های مایکروویو غیرفعال سنجنده و با استفاده از الگوریتم بازیابی پارامترهای زمین (LPRM) حاصل می‌شود.

الگوریتم LPRM مبتنی بر یک مدل انتقال تابشی پیش‌رونده برای بازیابی رطوبت خاک سطحی و عمق نوری پوشش گیاهی عمل می‌کند. همچنین دمای سطح زمین نیز به صورت مجزا از باند Ka (۳۶/۵ گیگاهرتز) سنجنده AMSR2 به دست آمده است (De Jue and Owe, 2014).



شکل ۱- نقشه خصوصیات توپوگرافی و موقعیت روستاها در محدوده مطالعاتی زیرمجموعه دشت نیشابور
Figure 1- Topographic characteristics and location of villages map in the study area of Neishabour plain

به منظور برآورد دو متغیر رطوبت خاک و دمای سطحی در محدوده مطالعاتی، از محصول فوق در دو گذر روز و شب استفاده شده است. تصاویر در بازه زمانی ۲۲ نوامبر ۲۰۱۷ (۱ آذر ۱۳۹۶) تا ۵ ژوئن ۲۰۱۸ (۱۵ خرداد ۱۳۹۷) و ۱ آوریل ۲۰۱۹ (۱۲ فروردین ۱۳۹۸) تا ۵ ژوئن ۲۰۱۹ (۱۵ خرداد ۱۳۹۸) از وب سایت داده‌های زمین به نشانی https://search.earthdata.nasa.gov و برای تمام روزها در بازه زمانی مذکور با فرمت NETCDF4 دریافت شده است.

ب) سنجنده MODIS: عملیات ریزمقیاس نمایی با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس انجام شده است. محصول دمای سطح زمین (LST: Land Surface Temperature) یکی از محصولات روزانه سنجنده مودیس در گروه MOD11 است که با قدرت تفکیک مکانی ۱۰۰۰ متر و با استفاده از الگوریتم روزنه مجزا (Split Window) بازیابی می‌شود. همچنین شاخص پوشش گیاهی اختلاف نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) که در فواصل ۱۶ روزه و در تفکیک‌های مکانی متنوع تولید می‌شود، نیز در محصول MOD13 سنجنده مودیس ارائه می‌شود. هر دو محصول فوق در ابعاد ۱۰۰ متر (LST) و ۲۵۰ متر (NDVI) از پایگاه داده‌های زمین دریافت شدند.

+ داده‌های هواشناسی: داده‌های ایستگاه هواشناسی همدیدی نیشابور واقع در بخش شمال شرقی محدوده مطالعاتی شامل بارش ۲۴ ساعته، دمای متوسط روزانه و دمای نقطه شبنم از اداره کل هواشناسی استان خراسان رضوی دریافت شد.

واسنجی اطلاعات رطوبت خاک سنجنده AMSR2: به منظور واسنجی داده‌های سنجنده AMSR2 پس از بر هم نهادن لایه‌های اطلاعاتی زیر، نقاط نمونه‌برداری در سطح محدوده مطالعاتی تعیین شد: ۱) لایه مرز محدوده مطالعاتی زیرمجموعه دشت نیشابور ۲) موقعیت مکانی پیکسل‌های سنجنده AMSR2 با ابعاد ۲۵ کیلومتر ۳) موقعیت مکانی پیکسل‌های سنجنده MODIS با ابعاد ۱۰۰۰ متر ۴) کاربری اراضی ۵) راه‌های اصلی و فرعی

با تلفیق لایه‌های فوق در محیط نرم افزار ArcMap 10.5 نقاط نمونه‌برداری به گونه‌ای انتخاب شد که به ازای هر پیکسل سنجنده AMSR2، ۵ نقطه وجود داشته باشد که این نقاط نماینده کاربری‌های اراضی غالب آن پیکسل باشند. در نهایت ۴ پیکسل که بیشترین پوشش در محدوده مورد نظر را داشتند گزینش شدند. سپس نقاط نمونه‌برداری با فرمت N_i نام‌گذاری شدند. که N نام پیکسل سنجنده AMSR2 واقع در محدوده مطالعاتی است و می‌تواند یکی از حروف A، B، C و D را اختیار کند. i شماره نقطه در هر پیکسل است. اندازه‌گیری رطوبت نمونه‌های خاک به صورت حجمی و به روش آون خشک انجام شده است. در طی مدت پژوهش ۵۶۰ نمونه خاک (۲۰ نمونه در ۲۸ نوبت) جمع‌آوری و اندازه‌گیری رطوبت خاک در محل آزمایشگاه گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد.

در شکل ۲ موقعیت پیکسل‌های AMSR2 و نقاط نمونه‌برداری نمایش داده شده است.

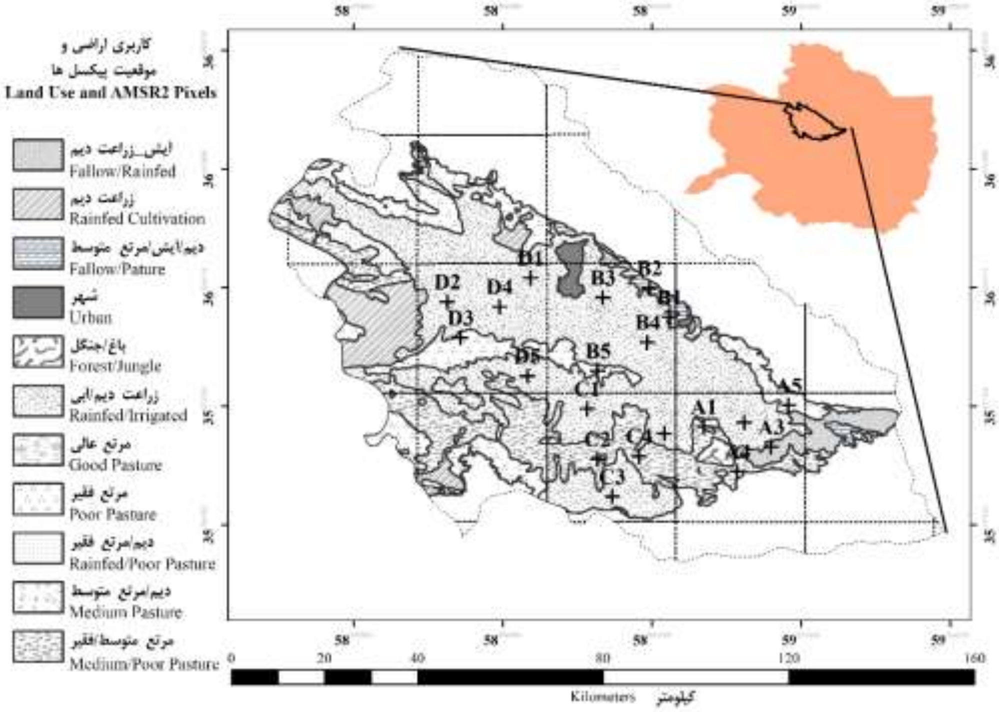
به منظور بررسی رابطه خطی بین داده‌های رطوبت خاک سنجنده AMSR2 و مقادیر اندازه‌گیری شده میدانی؛ ابتدا ضریب وزنی هر یک از نقاط متناسب با مساحت تحت پوشش کاربری اراضی آن نقطه (شکل ۲) محاسبه شده و سپس میانگین وزنی رطوبت حجمی نقاط ۵ گانه داده‌برداری شده در هر پیکسل با مقدار رطوبت خاک به دست آمده از سنجنده AMSR2 مقایسه شده است.

ریزمقیاس‌نمایی داده‌های رطوبت خاک سنجنده AMSR2:

فنگ و همکاران (Fang *et al.*, 2013) و فنگ و لاکشمی (Fang and Lakshmi, 2014) مدلی را برای ریزمقیاس نمایی داده‌های مایکروویو رطوبت خاک بزرگ مقیاس مبتنی بر دمای سطحی و پوشش گیاهی توسعه دادند. این مدل بر نظریه اینرسی حرارتی استوار است که مقاومت حرارتی یک شی را بیان می‌کند. اینرسی حرارتی متناسب با رسانایی گرمایی، تراکم و ظرفیت گرمایی ویژه مواد است. ظرفیت گرمایی ویژه آب به طور عمومی بیشتر از خاک فاقد پوشش گیاهی است و این بدان معنی است که زمین خشک نسبت به زمین مرطوب سریعتر به تغییرات دما پاسخ می‌دهد. از این ویژگی می‌توان برای تبیین رابطه بین مقدار متوسط روزانه رطوبت خاک و تغییرات دمای سطح زمین استفاده کرد. رابطه خطی ۱ بر همین اساس استوار است:

$$\theta^{av}_{(s,t)} = a_0 + a_1 \Delta Ts_{(s,t)} \qquad (۱)$$

در رابطه شماره ۱، $\theta^{av}_{(s,t)}$ میانگین رطوبت خاک روزانه (داده ماهواره‌ای یا ایستگاهی)، و $\Delta Ts_{(s,t)}$ نیز تغییرات روزانه دمای سطحی ثبت شده توسط ماهواره در طول مدت شبانه روز است. a_0 و a_1 به ترتیب شیب و عرض از مبدا خط برازش داده شده هستند. ابتدا با استفاده از رابطه فوق ارتباط بین تغییرات روزانه دمای سطحی و رطوبت خاک برآورد شده، سپس از همین رابطه برای برآورد رطوبت خاک با استفاده از محصول دمای سطحی مودیس استفاده شده است.



شکل ۲- نقشه کاربری اراضی، موقعیت پیکسل‌های AMSR2 و نقاط نمونه‌برداری رطوبت خاک

Figure 2– Land use, location of AMSR2 pixels and soil moisture sampling points map

شاخص خشکی کشاورزی مبتنی بر رطوبت خاک

شاخص خشکی کشاورزی رطوبت خاک (SMADI: Soil Moisture Agricultural Drought Index) در سال ۲۰۱۶ توسط سانچز و همکاران (Sánchez *et al.*, 2016) ارائه شد. این شاخص به طور کامل مبتنی بر داده‌های سنجش از دور بوده و با تلفیق تصاویر مرئی و مایکروویو در برادرنده متغیرهای دمای سطح زمین، پوشش گیاهی و رطوبت خاک محاسبه می‌شود. روابط محاسبه شاخص مذکور به‌صورت زیر است:

پس از محاسبه شاخص NDVI شاخص VCI از طریق رابطه ۲ محاسبه خواهد شد:

$$VCI = (NDVI_i - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min}) \quad (۲)$$

در رابطه شماره ۲ اندیس‌های i، min و max به ترتیب معرف مقدار شاخص پوشش گیاهی در هر پیکسل، حداقل و حداکثر مقدار شاخص پوشش گیاهی در هر تصویر است. پس از آن شاخص MTCI از طریق رابطه ۳ محاسبه خواهد شد:

$$MTCI = (LST_i - LST_{min}) / (LST_{max} - LST_{min}) \quad (۳)$$

در رابطه شماره ۳، LST، مقدار دمای سطح زمین است که از طریق تصاویر ماهواره‌ای به دست آمده است. و اندیس‌ها مشابه رابطه شماره ۲ است.

در مرحله بعد با استفاده از مقادیر رطوبت خاک دورسنجی، شاخص SMCI از طریق رابطه ۴ محاسبه خواهد شد:

$$SMCI = (SSM_{max} - SSM_i) / (SSM_{max} - SSM_{min}) \quad (۴)$$

در رابطه شماره ۴، SSM، مقدار رطوبت خاک است که از طریق تصاویر ماهواره‌ای به‌دست آمده است. همچنین اندیس‌های i، min و max به‌ترتیب معرف مقدار رطوبت خاک در هر پیکسل، حداقل و حداکثر مطلق رطوبت خاک در هر تصویر است.

بازه زمانی کاربرد شاخص SMADI متناسب با تغییر بازه زمانی استخراج مقادیر حداقل و حداکثر شاخص‌های ورودی آن تغییر می‌کند. به طور مثال مقادیر اندیس‌های min و max در مورد هر یک از شاخص‌های NDVI، LST و SSM می‌تواند مربوط به بازه زمانی روزانه، هفتگی، ماهانه و ... باشد. بر این اساس نتایج شاخص SMADI نیز در بازه روزانه، هفتگی و ... به‌دست خواهد آمد.

در نهایت شاخص SMADI با ترکیب شاخص‌های فوق و به‌صورت رابطه ۵ محاسبه می‌شود:

$$SMADI = SMCI \times MTCI / VCI \quad (۵)$$

کلیه شاخص‌های رابطه شماره ۵ مقداری بین صفر و یک دارند که در شاخص SMADI مقدار صفر بیانگر بیشترین تنش خشکی و

یک کمترین تنش خشکی خواهد بود. در روابط فوق، همه تصاویر متناسب با شاخص LST به‌دست آمده از محصولات سنجنده مودیس در مقیاس ۱۰۰۰ متر مورد استفاده قرار گرفته است.

به منظور ارزیابی نتایج، شاخص‌های آماری ضریب تعیین (R^2)، میانگین قدرمطلق خطا (MAE) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) در سه کاربری اراضی منتخب شامل زراعت دیم (R1)، مرتع متوسط (R2) و مرتع فقیر (R3) بررسی شد.

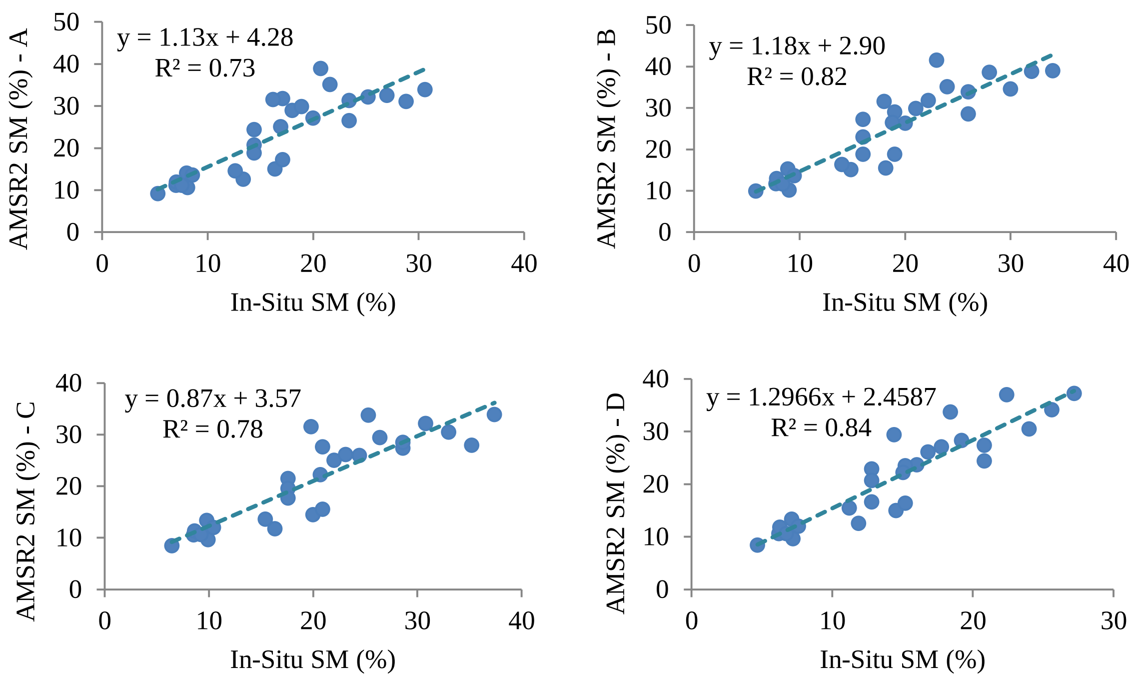
نتایج و بحث

واسنجی داده‌های رطوبت خاک سنجنده AMSR2

باتوجه‌به اختلاف‌های موجود در نوع پوشش کاربری هر یک از پیکسل‌ها؛ بر این اساس برازش رابطه خطی بین داده‌های رطوبت خاک سنجنده AMSR2 [که بعد از این با نام اختصاری AMSR2 SM یاد می‌شود] ابتدا با میانگین وزنی رطوبت خاک اندازه‌گیری شده میدانی [که بعد از این با نام اختصاری In-situ SM نمایش داده می‌شود] به ازای هر پیکسل صورت گرفته و سپس رابطه خطی برای کل محدوده مطالعاتی محاسبه شد. نتایج برازش رابطه خطی بین داده‌های ماهواره‌ای و مقادیر اندازه‌گیری شده میدانی به ازای هر یک از چهار پیکسل A، B، C و D در شکل ۳ ارائه شده است.

در شکل ۳، بیشترین میزان همبستگی بین دو متغیر In-situ SM و AMSR2 SM در پیکسل D با ضریب تبیین ۰/۸۴ و کمترین میزان همبستگی در پیکسل A با ضریب تبیین ۰/۷۳ مشاهده شد. به منظور ریشه‌یابی دلیل اختلاف واکنش به امواج الکترومغناطیسی در ۴ پیکسل مذکور، اختلاف وضعیت پوشش گیاهی و کاربری اراضی در آن‌ها بررسی شده است. در جدول ۱ خصوصیات آماری دامنه تغییرات شاخص پوشش گیاهی (NDVI) در محدوده مطالعاتی مربوط به سنجنده مودیس ارائه شده است.

مطابق شکل ۳ و جدول ۱ مشاهده می‌شود بیشترین تنوع کاربری اراضی در پیکسل A و کمترین آن در پیکسل D مشاهده می‌شود. خصوصیات آماری شاخص NDVI نشان می‌دهد پیکسل A از بیشترین مقدار و پیکسل D از کمترین میزان انحراف معیار برخوردار است. که این می‌تواند بیانگر میزان پراکندگی مقادیر حول میانگین باشد که فزونی آن در پیکسل A بیانگر تنوع و دامنه تغییرات وسیع‌تر پوشش گیاهی است. با بررسی مجدد شکل ۲ می‌توان دریافت بیشترین شیب تغییرات ارتفاع مربوط به پیکسل A و کمترین آن مربوط به D است.



شکل ۳- برازش رابطه خطی مجزا برای ۴ پیکسل A، B، C و D بین AMSR2 SM و Insitu SM (P<0.05)

Figure 3- Independent linear regression fitting for 4 pixels A, B, C and D between AMSR2 SM and Insitu SM (P<0.05)

جدول ۱- خصوصیات آماری تغییرات شاخص پوشش گیاهی NDVI در پیکسل‌های A، B، C و D

Table 1- Statistical characteristics of NDVI changes in pixels A, B, C and D

نام پیکسل Pixel name	شاخص پوشش گیاهی (NDVI) Normalized Difference Vegetation Index انحراف معیار Standard Deviation	میانگین Mean	کمینه Minimum	بیشینه Maximum
A	0.08	0.13	0.04	0.53
B	0.06	0.17	0.05	0.62
C	0.05	0.14	0.06	0.67
D	0.03	0.16	0.01	0.57

در جدول ۲ خلاصه بررسی شاخص‌های آماری مربوط به دقت برازش رابطه خطی ارائه شده است. در این جدول مقادیر خطاهای RMSE و MAE در محدوده ۱/۶ تا ۴ هستند که می‌توان در مقایسه با مقادیر میانگین داده‌ها (۱۵ تا ۲۰) قابل قبول دانست. در پیکسل C باتوجه‌به بیشتر بودن میانگین رطوبت خاک، اگر چه مقدار ضریب تبیین به‌دست آمده از پیکسل‌های B و D کمتر است اما مقادیر خطای RMSE و MAE کمتری نیز به‌دست آورده است. لذا می‌توان گفت گرچه رابطه برازش یافته قادر است حداکثر ۷۸ درصد تغییرات رطوبت خاک ماهواره‌ای را با تغییرات داده‌های میدانی تفسیر کند اما خط برازش داده شده رابطه ریاضی مناسبی بین متغیر مستقل و وابسته برقرار کرده و نقاط متناظر کمترین فاصله از این خط را دارا هستند. در مراحل بعدی این پژوهش از روابط رگرسیون به‌دست آمده در شکل ۳ به‌عنوان ضرایب واسنجی داده‌های AMSR2 استفاده شده است.

جدول ۲- خصوصیات آماری برازش رابطه خطی بین AMSR2 SM و In-Situ SM در پیکسل‌های A، B، C و D

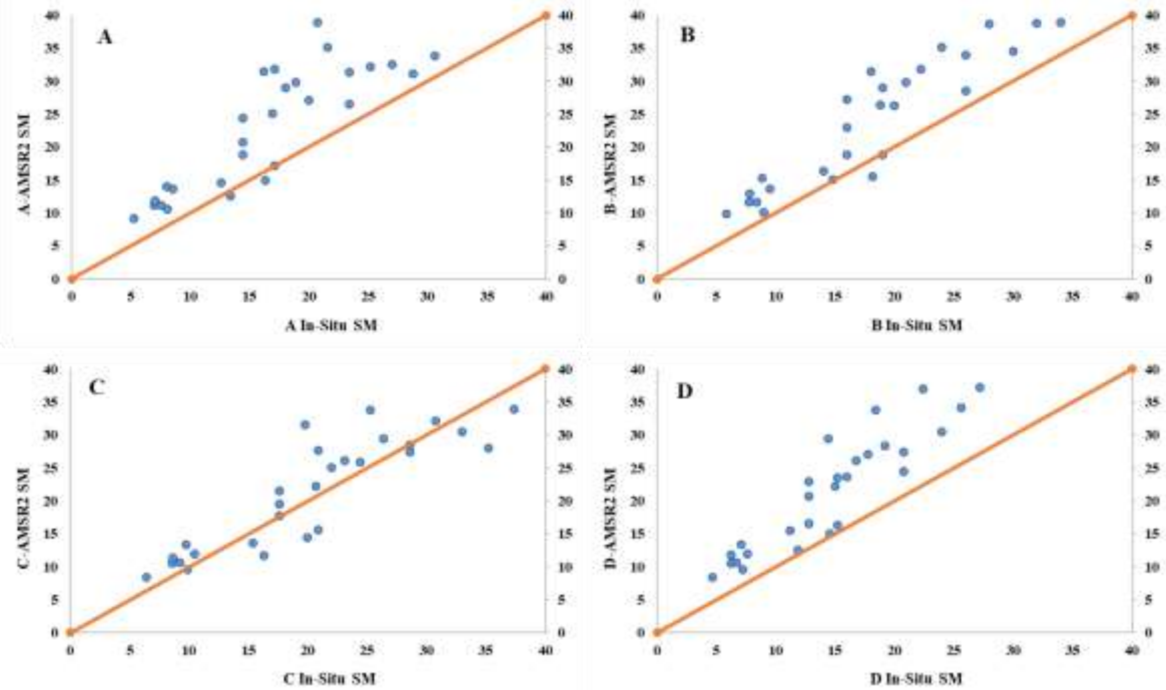
Table 2- Linear regression characteristics for 4 pixels A, B, C and D between AMSR2 SM and Insitu SM

نام پیکسل Pixel name	میانگین In-Situ SM Mean In-Situ SM	میانگین قدر مطلق خطا Mean Absolute Error (MAE)	ریشه میانگین مربعات خطا Root Mean Square Error (RMSE)	ضریب تبیین Coefficient of Determination (R^2)
A	16	3.3	4.0	0.73
B	18	3.2	3.8	0.82
C	20	6.1	2.1	0.78
D	15	3.4	3.9	0.84

در شکل ۴ وضعیت توزیع داده‌های متناظر رطوبت خاک اندازه‌گیری شده میدانی و دورسنجی در ۴ پیکسل مورد مطالعه نسبت به نیمساز ربع اول نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در هر ۴ پیکسل اغلب نقاط بالای خط نیمساز قرار گرفته و باتوجه به اینکه ستون عمودی به داده‌های دورسنجی اختصاص دارد از این‌رو مقادیر اندازه‌گیری شده توسط سنجنده دارای بیش‌برآورد هستند. همچنین مشاهده می شود که این وضعیت فارغ از خصوصیات فیزیکی پیکسل‌ها (به غیر از پیکسل C) رخ داده و بر این اساس می‌توان گفت ناشی از دقت اندازه‌گیری سنجنده و الگوریتم LPRM است. مقدار بیش برآورد در پیکسل‌های A، B و D به طور میانگین ۶ درصد و در پیکسل C حدود ۱ درصد است. لازم به ذکر است مقادیر بیش‌برآورد یا کم‌برآورد در روابط برازش یافته در جدول ۲ انعکاس یافته است.

- ریزمقیاس‌نمایی داده‌های رطوبت خاک:

در جدول ۳ خلاصه شاخص‌های آماری رابطه خطی بین تغییرات روزانه دما و AMSR2 SM که هر دو از سنجنده AMSR2 به دست آمده ارائه شده است. از آن جایی که اختلاف روزانه دمای سطحی رابطه عکس با میانگین رطوبت خاک سطحی دارد لذا کلیه ضرایب به دست آمده منفی است. همچنین کمترین ضریب تعیین به پیکسل A و بیشترین مقدار آن به پیکسل D و B تعلق دارد. باتوجه‌به اینکه تغییرات دما و رطوبت خاک هر دو تحت تاثیر عامل ارتفاع و پوشش گیاهی دستخوش تغییر می‌شوند لذا در این مورد نیز مشابه نتایج بخش قبل می‌توان کمینه و بیشینه ضرایب همبستگی را به تفاوت پیکسل‌ها از نظر پوشش گیاهی و دامنه تغییرات ارتفاعی ارتباط داد.



شکل ۴- توزیع مقادیر متناظر رطوبت خاک AMSR2 SM و Insitu SM برای ۴ پیکسل A، B، C و D نسبت به نیم‌ساز ربع اول

Figure 3 - Distribution of corresponding soil moisture values of AMSR2 SM and Insitu SM for 4 pixels A, B, C and D compared to the first quarter bisector

جدول ۳- شیب خط، عرض از مبدا و ضریب تعیین رابطه خطی تغییرات روزانه دما و AMSR2 SM ($P<0.05$)

Table 3- Slope, intercept and coefficient of determination of linear regression between daily temperature changes and AMSR2 SM ($P<0.05$)

نام پیکسل Pixel name	ضریب تعیین Coefficient of determination (R^2)	عرض از مبدا Intercept	شیب خط Line Slope
A	0.81	39.80	-2.44
B	0.95	41.76	-2.30
C	0.88	45.73	-2.67
D	0.95	50.97	-2.23

در گـام بعـدی، از روابـط فـوق بـرای محاسـبه رطوبـت خـاک ریزمقیاس شده در ابعاد ۱۰۰۰ متر استفاده شده است. بر ایـن اسـاس تغییرات دمای روزانه سـطحی بـه‌دسـت آمـده از اخـتلاف دو تصـویر سنجنده مودیس در گذر روز و شب (ماهواره های ترا و آکوا) به‌عنـوان ورودی رابطـه خطـی (برگرفتـه از روابـط ارائـه شـده در جـدول ۳) و خروجی آن رطوبت خاک ریزمقیاس شده سنجنده AMSR2 بـا ابعـاد ۱۰۰۰ متر خواهد بود که از این بـه بعـد بـا نـام اختصـاری (Down Scaled AMSR2: DS-AMSR2) معرفی می‌شود.

شاخص خشکی کشاورزی

به منظـور محاسـبه شـاخص خشـکی کشـاورزی SMADI سـه مجموع داده ورودی شامل رطوبت خاک، شـاخص پوشـش گیـاهی و دمای سطح زمین مورد نیاز است. باتوجه‌به توضـیحات ارائـه شـده در بخش‌های قبلـی، داده‌هـای ورودی فـوق بـه‌طـور کـامل مبتنـی بـر محصولات سنجنده مودیس و AMSR2 بـا ابعـاد ۱۰۰۰ متـر (ابعـاد مزرعه) استخراج شده است.

در پژوهش‌هـای مشـابه، بـه‌منظـور اعتبارسـنجی نتـایج از سـایر شاخص‌های خشکسالی کشاورزی مشابه، عملکرد محصولات زراعـی، شاخص پوشش گیاهی، بارندگی، رطوبت خـاک و امثـال آن اسـتفاده می‌شود. باتوجه‌به ماهیت کشاورزی و کوتاه مدت شـاخص SMADI در ایـن پـژوهش مقایسـه آن بـا شـاخص‌هـای مرسـوم خشکسـالی هواشناسی از جمله SPI و SPEI نمی‌توانست گزاره‌های درستی ارائه نماید، چرا که ماهیـت فیزیکـی و همچنـین بـازه‌هـای زمـانی آن بـا شاخص مورد استفاده در این پژوهش اساسا متفـاوت اسـت. از سـوی دیگر شاخص‌های وابسته بـه پوشـش گیـاهی ماننـد NDVI، VCI، SAVI و امثال آن نیز پیشاپیش در محاسبه شاخص SMADI به کار

رفته و استفاده از آن‌ها به‌عنوان ابزار اعتبارسنجی موجب بروز اریبی در نتایج ارزیابی می شود.

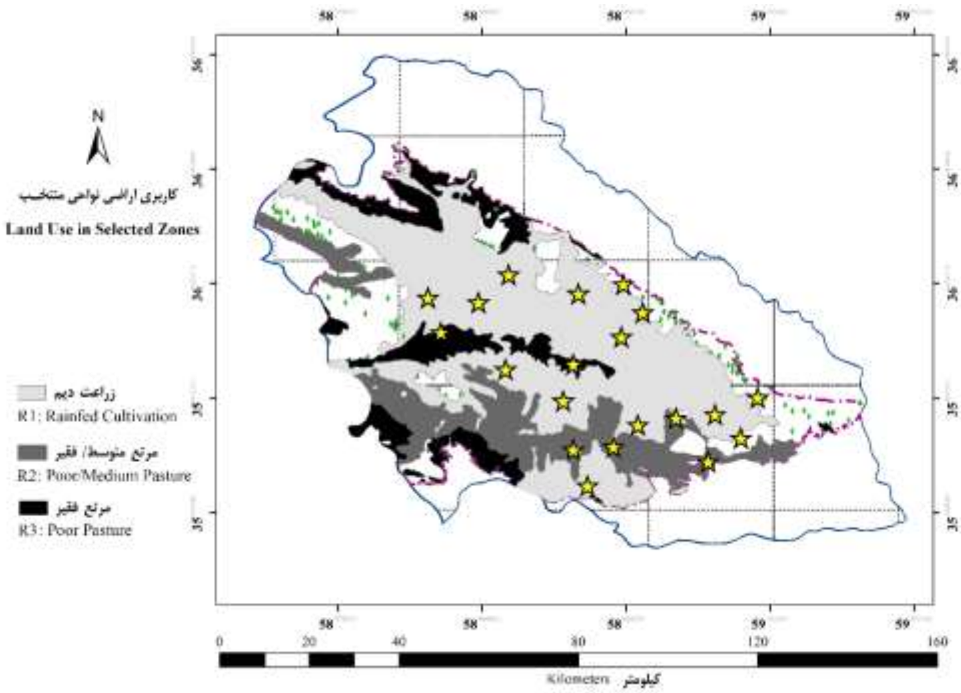
با این توضیح به‌منظور ارزیابی کیفی نتایج به‌دست آمده از محاسبه شاخص خشکی کشاورزی SMADI، سه مورد از مهم‌ترین و وسیع‌ترین کاربری‌های اراضی موجود در محدوده مطالعاتی که لااقل دو نقطه نمونه‌گیری رطوبت خاک میدانی در آن وجود داشت انتخاب شد و در هر یک از این مناطق، رابطه تغییرات بین سری زمانی شاخص‌های بارش (۲۴ ساعته)، میانگین رطوبت خاک (In-Situ SM) و میانگین شاخص خشکی کشاورزی (میانگین پیکسل‌ها در هر محدوده) مورد بررسی قرار گرفت.

در شکل ۵ محدوده کاربری اراضی منتخب و همچنین مساحت هر یک از محدوده‌ها بر حسب کیلومترمربع نمایش داده شده است. "زراعت دیم (R1)"، "مرتع متوسط–فقیر (R2)" و "مرتع فقیر (R3)" به‌ترتیب با مساحت ۲۱۷۸، ۷۱۲ و ۵۶۵ کیلومترمربع محدوده‌های انتخابی را شامل می‌شوند.

در شکل ۶ نمودار مقایسه تغییرات زمانی دو متغیر بارش و شاخص خشکی کشاورزی SMADI نمایش داده شده است. باتوجه‌به اینکه استخراج شاخص خشکی کشاورزی مشروط به وجود تصاویر مناسب و فاقد ابرناکی سنجنده مودیس است لذا امکان محاسبه شاخص در برخی روزها وجود نداشته و لذا به‌منظور حفظ یکپارچگی منحنی تغییرات شاخص خشکی کشاورزی، در کلیه نمودارهای ذیل، سری زمانی این متغیر به شکل میانگین متحرک با گام‌های زمانی سه روزه نمایش داده شده است.

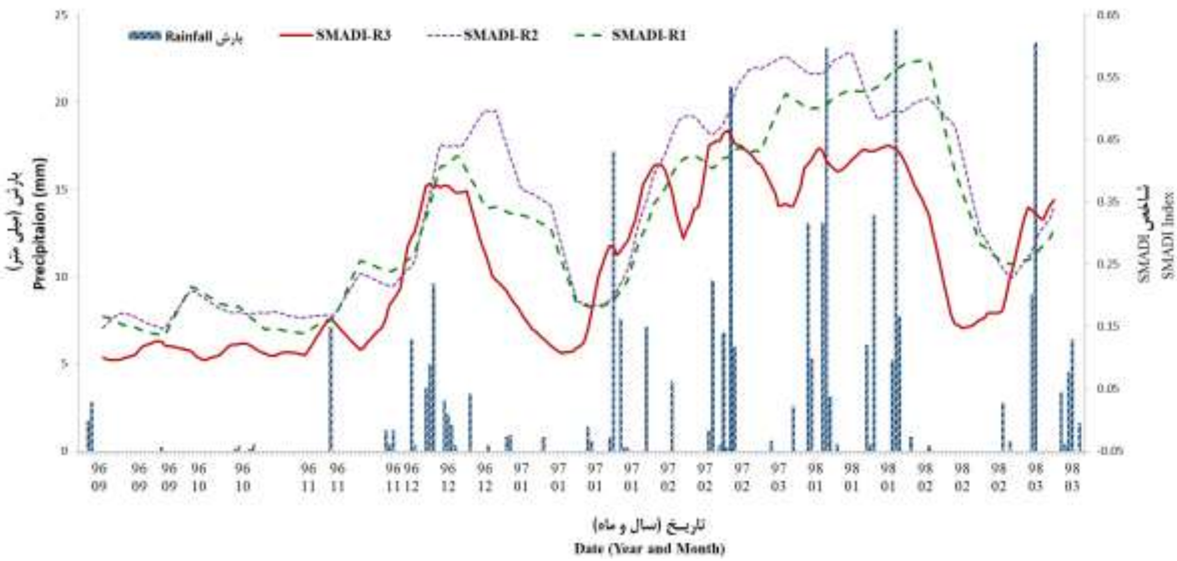
در شکل ۶ هر سه منحنی، روندی مشابه با تغییرات بارش را تجربه کرده‌اند و این نشان می‌دهد بارش یکی از موثرترین عوامل در بروز تغییرات عمده در نوسان شاخص خشکی کشاورزی SMADI است. چرا که علی‌رغم اختلاف در سایر عوامل محیطی در هر یک از محدوده‌های R1، R2 و R3 به ندرت نشانه‌ای از بروز نوسان قابل توجه در سری زمانی تغییرات شاخص مشاهده می‌شود.

همچنین مشاهده می‌شود تغییرات شاخص خشکی کشاورزی در هر سه منحنی با تاخیر ۱ تا ۸ روزه نسبت به تغییرات بارش منعکس شده است. کمترین تاخیر زمانی در محدوده R3 و بیشترین آن در R1 مشاهده می‌شود. همچنین در فصل زمستان بارش‌های جزئی (کمتر از ۵ تا ۷ میلی متر در روز) نتوانسته تاثیر چشم‌گیری بر تغییرات شاخص خشکی کشاورزی در دو محدوده R1 و R2 بگذارد درحالی‌که در محدوده R3 تغییرات شاخص خشکی کشاورزی، ارتباط مستقیم تری با وقوع نزولات جوی دارد. عدم بارش یکنواخت و محدودیت اندازه‌گیری روزانه آن در سطح دشت و همچنین اختلاف در پوشش گیاهی می‌تواند دو مورد از مهم ترین عوامل تاثیرگذار در وقوع این اختلاف باشد.



شکل ۵- نقشه محدوده‌های مکانی منتخب برای ارزیابی کیفی شاخص SMADI

Figure 5- Location of selected zone for SMADI index assessment



شکل ۶- نمودار سری زمانی تغییرات شاخص SMADI-R1، SMADI-R2 و SMADI-R3 در برابر بارش

(منحنی تغییرات شاخص خشکی کشاورزی میانگین متحرک سه روزه است).

Figure 6- Time series chart of SMADI-R1, SMADI-R2 and SMADI-R3 index against precipitation

(The change curve of agricultural drought index is a three-day moving average).

جدول ۴- جدول خلاصه خصوصیات آماری سری زمانی مقادیر شاخص SMADI در سه محدوده R1 تا R3

Table 4- Summary of statistical characteristics of time series of SMADI index values in three zones R1 to R3

	SMADI-R1	SMADI-R2	SMADI-R3
میانگین (Mean)	0.32	0.34	0.25
میانه (Median)	0.30	0.34	0.22
بیشینه (Maximum)	0.58	0.60	0.49
کمینه (Minimum)	0.13	0.13	0.09
دامنه تغییرات (Variation range)	0.45	0.47	0.40
انحراف معیار (Standard deviation)	0.14	0.15	0.13

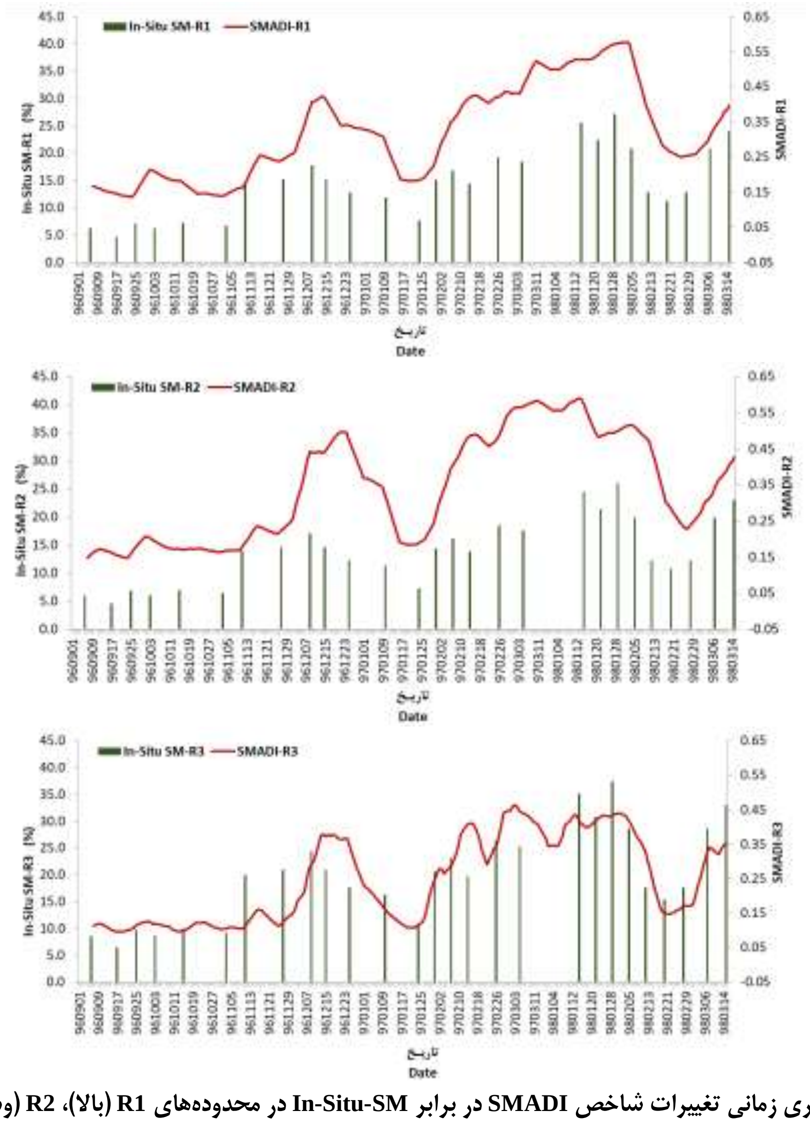
از سوی دیگر در فصل بهار در محدوده R1، تغییرات شاخص گرچه با الگوی تجمعی بارش همخوانی دارد، اما به نظر می‌رسد عوامل موثر دیگری همچون آبیاری اراضی، توامان بر تغییرات رطوبتی در محیط تاثیرگذار بوده است. عامل پوشش گیاهی و تغییرات اختلاف دمای کانوپی گیاهان در دوره‌های مختلف رشد نیز می‌تواند با تاثیر مستقیم بر تغییرات دمای سطح زمین، بر برآورد تنش خشکی کشاورزی توسط شاخص SMADI تاثیرگذار باشد. در شکل ۶ تغییرات شاخص خشکی کشاورزی در دو محدوده R1 و R2 از الگوی مشابهی پیروی کرده‌اند.

در جدول ۴ خلاصه خصوصیات آماری سری زمانی مقادیر شاخص SMADI در سه محدوده R1، R2 و R3، شامل میانگین، میانه، بیشینه، کمینه، دامنه تغییرات و انحراف معیار درج شده است.

مطابق جدول ۴، محدوده R2 بیشترین مقادیر کلیه شاخص‌های آماری را به خود اختصاص داده است. همچنین محدوده R3 از کمترین میزان شاخص‌های آماری برخوردار است. به‌منظور ارزیابی نتایج به‌دست آمده می‌توان عنوان کرد که پوشش مرتعی متوسط موجود در محدوده R2 تا حد زیادی وابسته به تغییرات محیطی بوده و در فصل سبزینگی مرتع چنانچه بارندگی کافی رخ ندهد تنش آبی رخ داده و شاخص خشکی کشاورزی متعاقبا کاهش می‌یابد. با وقوع بارندگی‌های پراکنده بهاری، بخشی از تنش وارده جبران شده و شاخص خشکی کشاورزی افزایش می‌یابد. وجود پوشش گیاهی مرتعی متوسط در سطح زمین و نوسانات بارندگی موجب گسترش دامنه تغییرات شاخص خشکی کشاورزی شده و طیف وسیع‌تری از مقادیر کمینه و بیشینه را رقم می‌زند. از سوی دیگر در محدوده R3 به دلیل وجود پوشش گیاهی ناچیز و فقیر، اساسا شاخص خشکی کشاورزی نقش کم‌رنگ تری پیدا کرده و لذا شرایط محیطی از جمله نوسانات بارندگی سهم عمده‌ای در تغییرات شاخص ایفا نمی‌کند، چرا که عامل پوشش گیاهی این نوسانات را تعدیل می‌کند.

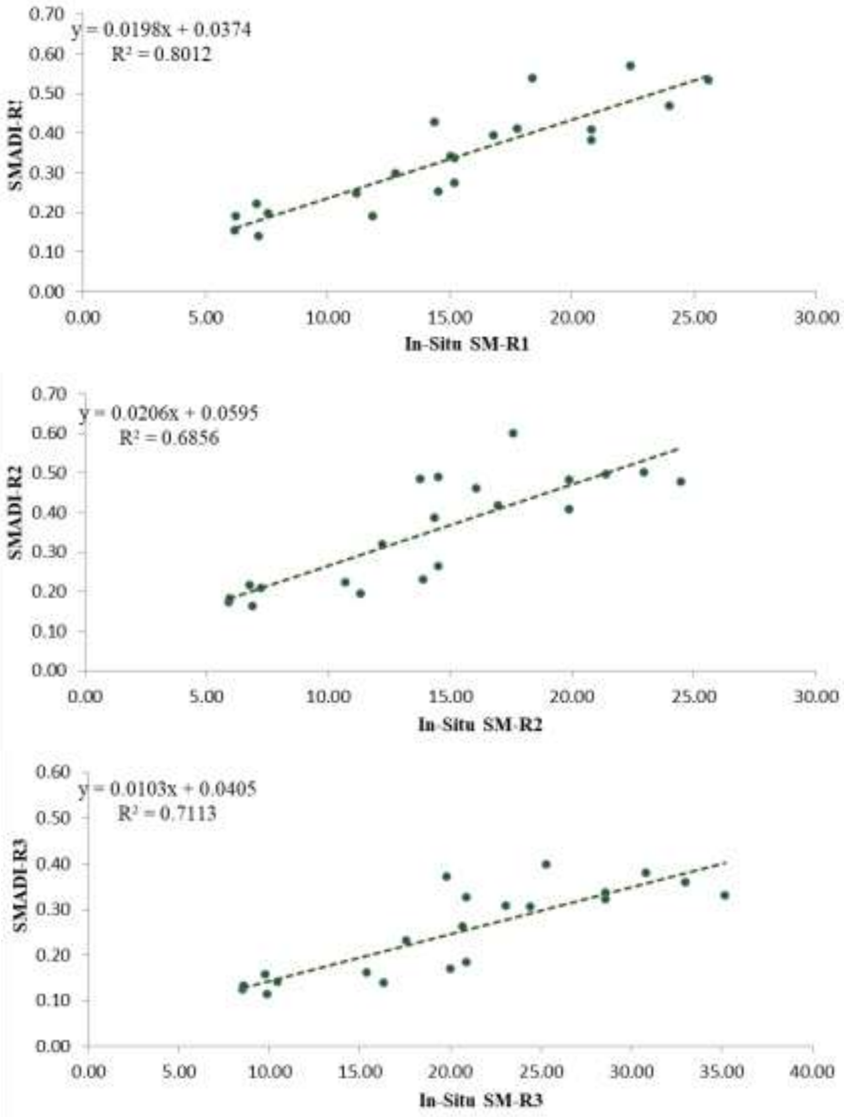
از سوی دیگر در محدوده R1 که بیشترین پوشش گیاهی محدوده مطالعاتی با کاربری غالبا زراعی را به خود اختصاص می‌دهد، گرچه نوسانات بارندگی می تواند نقش چشم‌گیری در کنترل شرایط بروز تنش آبی داشته باشد، اما اعمال برنامه آبیاری توسط زارعین نقش بارندگی را تضعیف کرده و لذا نسبت به محدوده R2 تغییرات کمتری را در شاخص خشکی کشاورزی بروز می‌دهد.

با بررسی رابطه تغییرات شاخص SMADI و رطوبت خاک اندازه‌گیری شده میدانی (In-Situ-SM) می‌توان نتایج به‌دست‌آمده از شکل ۶ را اعتبارسنجی کرد. شکل ۷ نمودار سری زمانی تغییرات شاخص SMADI در برابر In-Situ-SM در هر یک از محدوده‌های R1، R2 و R3 را نشان می‌دهد. در این نمودار گرچه هر سه منحنی روندی مشابه تغییرات رطوبت خاک اندازه‌گیری شده میدانی را پیموده‌اند اما همانطور که مشاهده می‌شود بیشترین تشابه در روند تغییرات شاخص خشکی کشاورزی (دورسنجی) و رطوبت خاک (مشاهدات میدانی)، در محدوده R1 به چشم می‌خورد. پس از آن محدوده R3 و سپس R2 تشابه کمتری را نشان می‌دهند.



شکل ۷- نمودار سری زمانی تغییرات شاخص SMADI در برابر In-Situ-SM در محدوده‌های R1 (بالا)، R2 (وسط) و R3 (پایین)

Figure 7- SMADI index time series against In-Situ-SM in R1 (top), R2 (middle) and R3 (bottom) zones



شکل ۸- نمودار برازش رابطه خطی بین شاخص SMADI و متغیر In-Situ-SM در محدوده‌های R1 (بالا)، R2 (وسط) و R3 (پایین) (P<0.05)

Figure 8- Linear regression chart between SMADI index and In-Situ-SM for R1 (top), R2 (middle) and R3 (bottom) zones (P<0.05)

در محاسبه شاخص SMADI عامل SMCI برگرفتـه از تصـاویر ریزمقیاس شـده سـنجنده AMSR2 نقـش مـوثری در اعمـال تـاثیر تغییرات رطوبت خاک سطحی ایفا مـی‌کنـد. از سـوی دیگـر پوشـش گیاهی و سلامت محصولات زراعی صرفا از شرایط سطح زمین تـاثیر نپذیرفته و تغییرات رطوبت خاک در ناحیه ریشه نیز نقش ویژه‌ای دارد که این امر موجب پیچیده شدن ارتباط بین تغییرات شـاخص خشـکی کشاورزی و تغییرات رطوبت خاک سطحی می‌شـود. بـر ایـن اسـاس نباید انتظار داشت تغییرات رطوبت خاک به تنهایی موجب افزایش یـا کاهش شاخص خشکی کشاورزی در کوتاه مدت شود. همین امـر نیـز ارزیابی عملکرد شاخص‌های خشکی کشاورزی را دشوار می‌سازد.

در شکل ۸ رابطه خطی بین دو متغیـر SMADI و In-Situ-SM نمایش داده شده است. در این شکل روابط خطی محاسبه شده گرچه توانسته‌اند سطح قابل قبولی از ارتباط تغییرات زمانی شاخص خشـکی کشاورزی با رطوبت خاک اندازه‌گیری شده میدانی را تبیین کننـد، امـا در بهترین حالت (محدوده R1) ۸۰ درصد (ضریب تعیین ۰٫۸) تغییرات شـاخص SMADI-R1 وابسـته بـه In-Situ SM-R1 بـوده و بـاقی تغییرات به سایر عوامل محیطـی ارتبـاط داشـته اسـت. ایـن عـدد در محدوده R3 به ۶۸ درصد کاهش می‌یابد.

باتوجه‌به مجموعه تحلیـل‌هـای صـورت گرفتـه مـی‌تـوان گفـت اندرکنش‌های بین بارش، رطوبت خـاک، پوشـش گیـاهی و تغییـرات پروفیـل دمـایی کـانوپی بـه خـوبی در شـاخص خشـکی کشـاورزی SMADI انعکاس یافته و این ویژگـی کـاربرد آن را در تحلیـل‌هـای

هواشناسی کشاورزی توجیه و تقویت می‌کند.

اتکای اغلب شاخص‌های هواشناسی یا هواشناسی کشاورزی به بارش یا یکی از شاخص‌های پوشش گیاهی و همچنین عدم امکان کاربرد آن ها در پهنه‌های وسیع به دلیل وابسته بودن به داده‌های نقطه‌ای و ایستگاهی از جمله نقاط ضعفی است که در الگوریتم محاسبه شاخص SMADI تا حد زیادی مرتفع شده است. چرا که فیزیک این شاخص بر تلفیقی از پوشش گیاهی، رطوبت خاک و تغییرات دمایی و بهره‌مندی از داده‌های دورسنجی استوار است. بررسی‌های آقاکوچک (AghaKouchak, 2014) نیز موید همین رویکرد است.

نتیجه‌گیری

نتایج واسنجی رطوبت خاک سطحی سنجنده AMSR2 که با استفاده از الگوریتم LPRM توسط JAXA بازیابی شده است حاکی از آن است که با در نظر گرفتن مقادیر خطاهای برازش رابطه خطی بین داده‌های دورسنجی و اندازه‌گیری شده میدانی، مقدار RMSE و MAE در محدوده ۱٫۶ تا ۴ درصد محاسبه شد که می‌توان این میزان خطا را در مقایسه با مقادیر میانگین داده‌ها (۱۵ تا ۲۰) قابل قبول دانست. همچنین کمترین ضریب تعیین ۷۳ برای پیکسل A از پیکسل‌های چهارگانه و بیشترین آن ۸۴ درصد برای پیکسل D محاسبه شد و این بیانگر آن است که حداقل ۷۳ درصد تغییرات رطوبت خاک اندازه‌گیری شده میدانی، در داده‌های دریافت شده از سنجنده AMSR2 منعکس شده است. نتایج پژوهش فرخی و همکاران (Farokhi *et al.*, 2019) نیز موید این ویژگی بوده است. از سوی دیگر روند تغییرات رطوبت خاک دورسنجی، تطبیق خوبی با روند تغییرات سایر متغیرهای محیطی به ویژه بارش داشت. همچنین نتایج این فرضیه را تقویت کرد که دو عامل پوشش گیاهی و تغییرات ارتفاعی سطح زمین از جمله عوامل موثر در اعتبارسنجی و واسنجی داده‌های دورسنجی رطوبت خاک محسوب می‌شوند. در این پژوهش از داده‌های ریزمقیاس شده رطوبت خاک در ابعاد ۱۰۰۰ متر برای محاسبه شاخص خشکی کشاورزی استفاده شد. همچنین پس از تولید سری زمانی شاخص، با استفاده از مقایسه نتایج با سری زمانی بارش و رطوبت خاک اندازه‌گیری شده میدانی، عملکرد شاخص ارزیابی شد.

فنگ و همکاران (Fang *et al.*, 2013) و فنگ و لاکشمی (Fang and Lakshmi, 2014) نیز نتایج مشابهی را در مطالعات خود مشاهده کردند. بر این اساس با انتخاب سه نوع کاربری زمین غالب در محدوده مطالعاتی، رابطه بین متغیرهای ذکر شده در این سه محدوده به‌صورت مجزا بررسی شد. نتایج نشان داد تغییرات شاخص خشکی کشاورزی در هر سه محدوده روندی مشابه با تغییرات بارش را تجربه کرده‌اند و این نشان می‌دهد بارش یکی از موثرترین عوامل در بروز تغییرات عمده در نوسان شاخص خشکی کشاورزی SMADI است. همچنین مشاهده شد تغییرات شاخص خشکی کشاورزی در هر سه منحنی با تاخیر ۱ تا ۸ روزه نسبت به تغییرات بارش منعکس شده است. در هر سه محدوده، شاخص SMADI روندی مشابه تغییرات رطوبت خاک اندازه‌گیری شده میدانی را پیموده‌اند. برازش روابط خطی بین رطوبت خاک محاسبه شده نشان داد گرچه توانسته‌اند سطح قابل قبولی از ارتباط تغییرات زمانی شاخص خشکی کشاورزی با رطوبت خاک اندازه‌گیری شده میدانی را تبیین کنند اما در بهترین حالت (۸۰ درصد در محدوده R1 درصد (ضریب تعیین ۰/۸)) تغییرات شاخص SMADI-R1 وابسته به In-Situ SM-R1 بوده و باقی تغییرات به سایر عوامل محیطی ارتباط داشته است. این عدد در محدوده R3 به ۶۸ درصد کاهش می‌یابد.

باید به این نکته توجه داشت که پایش رطوبت خاک می‌تواند با دقت بیشتری نسبت به سایر متغیرها تاثیر عوامل محیطی بر تغییرات شاخص خشکی کشاورزی را منعکس نماید چرا که بارندگی ثبت شده در محل ایستگاه هواشناسی الزاما به‌صورت یکنواخت در سطح محدوده مطالعاتی رخ نداده و از سوی دیگر هر میزان بارندگی الزاما منجر به تغییر موثر ذخیره رطوبتی خاک نخواهد شد. همین امر نیز ارزیابی عملکرد شاخص‌های خشکی کشاورزی را دشوار می‌سازد. این موضوع در پژوهش مودانسی و همکاران (Modanesi *et al.*, 2019) نیز مورد توجه قرار گرفته است. در مجموع می‌توان گفت اندرکنش‌های بین بارش، رطوبت خاک، پوشش گیاهی و تغییرات پروفیل دمایی کانوپی به خوبی در شاخص خشکی کشاورزی SMADI که در ابعاد مقیاس مورد بررسی قرار گرفته انعکاس یافته و این ویژگی کاربرد آن را در تحلیل‌های هواشناسی کشاورزی توجیه و تقویت می‌کند.

منابع

1. Adegoke J.O., and Carleton A.M. 2002. Relations between Soil Moisture and Satellite Vegetation Indices in the U.S. Corn Belt. Journal of Hydrometeorology 3: 395-405. https://doi.org/10.1175/1525-7541(2002)003%3c0395:RBSMAS%3e2.0.CO;2.
2. Adnan M., Merwade V., and Yu Z. 2016. Multi-objective calibration of a hydrologic model using spatially distributed remotely sensed / in-situ soil moisture. Journal of Hydrology 536: 192–207. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.02.037.
3. AghaKouchak A. 2014. A baseline probabilistic drought forecasting framework using Standardized Soil Moisture

Index: Application to the 2012 United States drought. Hydrol. Earth Systematic Science 18(7): 2485–2492. https://doi.org/10.5194/hess-18-2485-2014,%202014.
4. Boken V.K. 2005. Monitoring and Predicting Agricultural Drought: A Global Study. Oxford Univ. Press. New York. 496. https://doi.org/10.1093/oso/9780195162349.001.0001.
5. Brocca L., Ciabatta L., Massari C., Camici S., and Tarpanelli A. 2017. Soil moisture for hydrological applications: open questions and new opportunities. Water 9(2): 140. https://doi.org/10.3390/w9020140.
6. Carrão H., Russo S., Sepulcre-canto G., and Barbosa P. 2016. An empirical standardized soil moisture index for agricultural drought assessment from remotely sensed data, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. International Journal Apply Earth Obs Geoinf 48:74-84. https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.06.011.
7. Chen J., Wen J., and Tian H. 2016. Representativeness of the ground observational sites and up-scaling of the point soil moisture measurements. Journal of Hydrology 533: 62–73. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.11.032.
8. Chen L., and Wang L. 2018. Recent advance in earth observation big data for hydrology. Big Earth Data. 1–22. https://doi.org/10.1080/20964471.2018.1435072.
9. De Jue R.D., and Owe M. 2014. AMSR2/GCOM-W1 surface soil moisture (LPRM) L3 1 day 25 km x 25 km ascending V001, Edited by Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC) (Bill Teng). Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC). Greenbelt. MD. USA. https://doi.org/10.5067/CGDEOBASZ178.
10. Dostálová A., Doubková M., Sabel D., Bauer-Marschallinger B., and Wagner W. 2014. Seven years of advanced synthetic aperture radar (ASAR) global monitoring (GM) of surface soil moisture over Africa. Remote Sens 6(8): 7683–7707. https://doi.org/10.3390/rs6087683.
11. Entekhabi D., Reichle R.H., Koster R.D., and Crow W.T. 2010. Performance metrics for soil moisture retrievals and application requirements. Journal Hydrometeorology 11(3): 832–840. https://doi.org/10.1175/2010JHM1223.1.
12. Fang B., and Lakshmi V. 2014. Soil moisture at watershed scale : Remote sensing techniques. Journal of Hydrology 516:2014: 258–272. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.12.008.
13. Fang B., Lakshmi V., Bindlish R., Jackson T.J., Cosh M., and Basara J. 2013. Passive Microwave Soil Moisture Downscaling Using Vegetation Index and Skin Surface Temperature. Vadose Zone Journal https://doi.org/10.2136/vzj2013.05.0089.
14. Farokhi M., Ansari H., and Faridhosseini A. 2019. Integration of retrievals of the AMSR2 sensor with MODIS products to estimate soil moisture at high resolution. Iranian Journal of Irrigation and Drainage 13(3): 687-698. (In Persian with English abstract)
15. Fashaee M., and Sanaei Nejad S.H. 2021. Downscaling Retrievals of the AMSR2 Passive Microwavee Soil Moisture Imagery to Farm Scale. Iranian Journal of Irrigation and Drainage 14(6): 1973–1983. (In Persian with English abstract). https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087942.2021.14.6.28.9.
16. Ghafari E., Davari K., and Farid Hosseini A. 2020. Development of Improved Algorithms for Downscaling SMAP-Derived Soil Moisture Using Visible/Inferred satellite observations. Iranian Journal of Irrigation and Drainage 14(2): 650–660. (In Persian with English abstract)
17. Jagdhuber T., Konings A.G., McColl K.A., Alemohammad S.H., Das N.N., Montzka C., Link M., Akbar R., and Entekhabi D. 2019. Physics-Based Modeling of Active and Passive Microwave Covariations Over Vegetated Surfaces. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 57: 788-802. https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2860630.
18. Kim J., and Hogue T. 2012. Improving spatial soil moisture representation through integration of AMSR-E and MODIS products. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens 50(2): 446–460. https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2161318.
19. Kim S., Liu Y.Y., Johnson F.M., Parinussa R.M., and Sharma A. 2015. A global comparison of alternate AMSR2 soil moisture products: Why do they differ?. Remote Sensing of Environment 161: 43–62. https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.02.002.
20. Martinez-Fernández J., González Zomora A., Sánchez N., and Gumuzzio A. 2016. Remote Sensing of Environment Satellite soil moisture for agricultural drought monitoring: Assessment of the SMOS derived Soil Water De fi cit Index. Remote Sensing of Environment 177: 277–286. https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.064.
21. Mladenova I.E., Bolten J.D., Crow W., Sazib N., and Reynolds C. 2020. Agricultural Drought Monitoring via the Assimilation of SMAP Soil Moisture Retrievals Into a Global Soil Water Balance Model. Frontiers in Big Data 3: 10. https://doi.org/10.3389/fdata.2020.00010
22. Modanesi S., Massari C., Camici S., Brocca L., and Amarnath G. 2019. Do Satellite Surface Soil Moisture Observations Better Retain Information About Crop- Yield Variability in Drought Conditions?. Water Resources Research 56(2). https://doi.org/10.1029/2019WR025855.
23. Mohanty B.P., Cosh M.H., Lakshmi V., and Montzka C. 2017. Soil moisture remote sensing: state-of-the-science.

Vadose Zone Journal 16(1): 1–9. https://doi.org/10.2136/vzj2016.10.0105.
24. Montzka C., Bogena H.R., Zreda M., Monerris A., Morrison R., Muddu S., and Vereecken H. 2017. Validation of spaceborne and modelled surface soil moisture products with cosmic-ray neutron probes. Remote Sens 9(2): 103–136. https://doi.org/10.3390/rs9020103.
25. Niazi Y., Talebi A., Mokhtari M.H., and Vazifedoust M. 2018. Presenting a soil moisture-based drought index derived from Global Land Data Assimilation System (GLDAS-SMDI) in central Iran. Scientific Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR) 27(107): 179–191. http://doi.org/10.22131/SEPEHR.2018.33574.
26. NOAA Office of Satellite and Product Operation (OSPO) website, About AMSR-2, https://www.ospo.noaa.gov/Products/atmosphere/gpds/about_amsr2.html. Date of Visit: 2020-05-13.
27. Paredes-trejo F., and Barbosa H. 2017. Evaluation of the SMOS-Derived Soil Water Deficit Index as Agricultural Drought Index in Northeast of Brazil. https://doi.org/10.3390/w9060377.
28. Peng J., and Loew A. 2017. Recent advances in soil moisture estimation from remote sensing. Water 9(7): 530–534. https://doi.org/10.3390/w9070530.
29. Saha A., Patil M., Goyal V., and Rathore DS. 2018. Evaluation W. Assessment and Impact of Soil Moisture Index in Agricultural Drought Estimation Using Remote Sensing and GIS Techniques. 3rd International Electronic Conference on Water Sciences (ECWS-3), 2018; (November). https://doi.org/10.3390/ECWS-3-05802.
30. Sánchez N., González-zamora Á., Piles M., and Martínez-fernández J. 2016. SMADI Integrating MODIS and SMOS Products: A Case of Study over the Iberian Peninsula. https://doi.org/10.3390/rs8040287.
31. Sur C., Park S., Kim T., and Lee J. 2019. Remote Sensing-based Agricultural Drought Monitoring using Hydrometeorological Variables. KSCE Journal of Civil Engineering 23: 5244–5256. https://doi.org/10.1007/978-3-319-43744-6_7.
32. Takada M., Mishima Y., and Natsume S. 2009. Estimation of surface soil properties in peatland using ALOS/PALSAR. Landscape Ecology Engineering 5(1): 45–58. http://dx.doi.org/10.1007/s11355-008-0061-4.
33. Velayati S. 2000. The most important factors affecting the qualitative changes of Neishabour plain aquifer. Geographical Researches Journal 149: 119-134. (In Persian)
34. Wilhite D.A. 2005. Drought and Water Crises: Science, Technology, and Management Issues. CRC Press 86: 432. https://doi.org/10.1201/9781420028386.
35. Wang L., and Qu J.J. 2009. Satellite remote sensing applications for surface soil moisture monitoring: A review. Front. Earth Science Chin 3(2): 237–247. https://doi.org/10.1007/s11707-009-0023-7.
36. Wang J., Ling Z., Wang Y., and Zeng H. 2016. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing Improving spatial representation of soil moisture by integration of microwave observations and the temperature–vegetation–drought index derived from MODIS products. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 113: 144–154. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.009.
37. Zhang D., Li Z.L., Tang R., Tang B.H., and Wu H. 2014. A remote sensing technique to determine the soil moisture saturation index. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research 978-1-4799-5775-0/14. 3280. https://doi.org/10.1109/IGARSS.2014.6947180.
38. Zhu Q., Luo Y., Xu Y., Tian Y., and Yang T. 2019. Satellite Soil Moisture for Agricultural Drought Monitoring: Assessment of SMAP-Derived Soil Water Deficit Index in Xiang River Basin. Remote Sensing 11(3): 362. https://doi.org/10.3390/rs11030362.